Завада А.А., аспирант

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА СУБЛИМАЦИИ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Рассмотрим задачу о движении газа, в цилиндрическом канале длиной L и радиусом R (рис. 1). Вдоль оси канала поддерживается заданное распределение температуры $T(x)$ (температура на входе в канал постоянна и равна T_1, на выходе - T_2). На входе подается газообразное рабочее вещество с заданным давлением P_1 и потоком G. Выход канала находится в условиях постоянной откачки. Предполагается, что на стенке находится слой конденсированного рабочего вещества, который может изменяться за счёт постоянного потока испаряющихся молекул с плотностью n_s, зависящей от температуры стенки в данной точке. Поток конденсирующихся молекул обусловлен их плотностью в газовой фазе $n(x)$, при этом считается, что вероятность конденсации при столкновении с поверхностью равна единице.

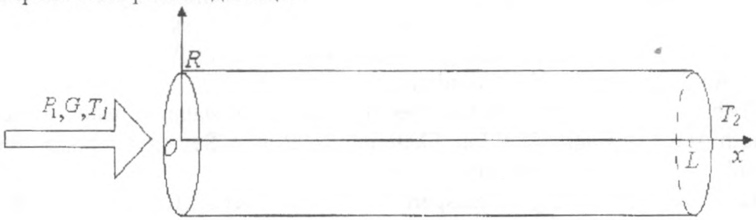

Рис. 1. Цилиндрический канал длиной L и радиусом R

Необходимо получить распределение плотности газа вдоль оси канала при заданных граничных условиях.

Для решения поставленной задачи запишем уравнение баланса рабочего вещества в единичном элементе длины канала, расположенном около произвольной точки интервала $(0,L)$. Вследствие возможного осаждения газовых молекул на поверхности канала уравнение баланса в произвольном сечении x можно записать в следующем виде:

$$S\frac{\partial(nu)}{\partial x}=\frac{1}{4}\upsilon_t 2\pi R(n_s-n)\,, \qquad (1)$$

где n_s – числовая плотность насыщенных паров; R – радиус канала; S – площадь поперечного сечения канала; υ_t - средне-тепловая скорость молекулы; n – числовая плотность газа (искомая функция координаты x); u – проекция скорости газового потока на ось x.

Левая часть уравнения (1) представляет собой изменение потока рабочего вещества через поперечное сечение канала, приходящееся на единицу его длины, а в правой части записан результирующий поток молекул на боковую стенку (или со стенки) элемента поверхности канала единичной длины. Уравнение (1) составлено в предположении, что длина L много больше радиуса R рассматриваемой трубы. При этом плотность и температура газа слабо зависят от поперечных координат.

В качестве граничных условий к уравнению (1) следует принять следующие равенства:

$G = unS\big|_{x=0}$,	(2)
$unS\big|_{x=L} = G - \frac{\pi}{2} R \int_0^L \upsilon_t (n - n_s) dx.$	(3)

Условие (2) связано с тем, что подводимый к входному сечению поток G вещества должен быть равен потоку его отвода по каналу. Условие (3) отражает закон сохранения рабочего вещества в применении ко всему каналу длиной L.

Уравнение (1) кроме искомой функции $n(x)$ содержит ещё и функцию $n_s(x)$. Для того чтобы найти $n_s(x)$, воспользуемся известным эмпирическим уравнением для давления насыщенных паров рабочего вещества:

$\lg P_s = a - \frac{b}{T}$,	(4)

где P_s определяется в *мм Hg*, а T - в кельвинах, a и b - константы.

Для получения зависимости $n_s(x)$ воспользуемся уравнением состояния идеального газа:

$P_s = n_s kT$,	(5)

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ *Дж/K* – постоянная Больцмана.

Подставляя (5) в (4), получим:

$n_s = n_s(x) = \frac{C_1^s}{T(x)} e^{-\frac{C_2^s}{T(x)}}$,	(6)

где $C_1^s = 1.496 \cdot 10^{36} [K / м^3], C_2^s = 6.249 \cdot 10^3$[K].

Для исходных расчётов примем, что температура вдоль длины канала распределена линейно:

$T(x) = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{L} x$.	(7)

Для определения потока $G(x)$ в произвольном сечении воспользуемся формулой Пуазейля, считая, что процесс осаждения частиц рабочего вещества на боковые стенки длинного канала ($L>>R$) не повлияет на поток в продольном направлении:

$G = nuS = -nS \frac{R^2}{8\eta} \frac{dP}{dx}$.	(8)

Подставляя (8) в (1), получим замкнутое уравнение для искомой функции $n(x)$:

$\frac{1}{4} \upsilon_t 2\pi R (n_s - n) = -\frac{R^2 kS}{8\eta} \frac{d}{dx} \left\{ n \left[\frac{dn}{dx} T + \frac{dT}{dx} n \right] \right\}$.	(9)

Для решения уравнения (9) воспользуемся численно-итерационной схемой. Представим искомую функцию распределения плотности $n(x)$ в виде суммы плотности насыщенных $n_s(x)$ паров и некоторой добавки $\Delta n(x)$:

$n(x) = n_s(x) + \Delta n(x)$.	(10)

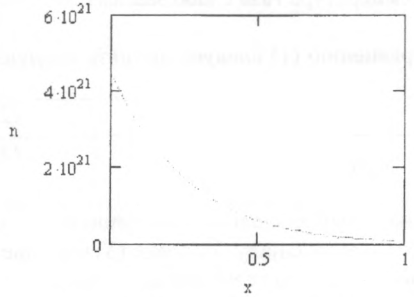

Рис. 2. Зависимость плотности $n(x)$ от продольной координаты

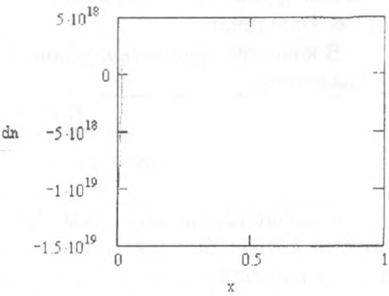

Рис. 3. Зависимость разности плотностей $\Delta n(x)$ от продольной координаты

На рис. 2 представлена зависимость плотности $n(x)$, а на рис. 3 – разности плотностей $\Delta n(x)$ от продольной координаты. Данные были получены при следующих условиях: длина канала $L = 1$ *м*, радиус канала $R = 0{,}003$ *м*, температура на входе $T_1 = 223$ K, температура на выходе $T_2 = 193$ K, поток газа на входе $G = 500$ *мг/ч*, количество расчетных ячеек $M = 50$, количество итераций $N_{it} = 100$.

На рис. 3 можно наблюдать скачок величины $\Delta n(x)$ в области входного сечения. Данный скачок возникает в результате того, что поток $G = 500$ *мг/час* меньше значения потока, рассчитанного по формуле (8), где в качестве плотности необходимо поставить плотность насыщенных паров. Для данных условий поток, который обеспечивается плотностью насыщенных паров, равен $G = 890$ *мг/ч*.

Работа выполнена под руководством Б. Т. Породнова, проф., д-ра физ.-мат. наук.